АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 535.854

А. Г. СЕРКИН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ОБЪЕМНОЙ ГОЛОГРАММОЙ

В статье представлены результаты экспериментальных исследований интерференционного измерителя малых перемещений с объемной голограммой и экспериментально обоснованные предложения по его совершенствованию.
Ключевые слова: *измерение малых перемещений, лазерный интерферометр, объемная голограмма.*

Введение. Точность измерения малых перемещений и длин в настоящее время является определяющей для любого высокотехнологичного производства. Основными направлениями совершенствования лазерных интерферометров являются:

- использование перспективных оптических схем интерферометров, совершенствование источников и приемников оптического излучения;
- наращивание возможностей автоматизации, позволяющих осуществлять непрерывный учет влияющих факторов с автоматическим выполнением коррекции и введением поправок в режиме реального времени.

Постановка задачи. В настоящее время известны интерференционные измерители малых перемещений, содержащие оптически связанные и последовательно размещенные источник когерентного оптического излучения, оптическую систему, светоделитель, отражатель и фотоприемное устройство. В [1] предложено в качестве светоделителя использовать объемную Фурье-голограмму.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований функциональных и технических характеристик измерителя малых перемещений, описанного в [1]. Цель исследований:

- экспериментально подтвердить технические преимущества применения объемных Фурье-голограмм в качестве светоделителей;
- разработать и обосновать технические предложения по совершенствованию лазерных измерителей малых перемещений.

Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента. Для проведения исследований была разработана и создана экспериментальная установка, схема которой изображена на рис. 1. В состав установки входят источник излучения 1 (He-Ne лазер непрерывный, длина волны λ=0,63 мкм); собирающая линза 2; диафрагма пространственного фильтра 3; светоделитель 4 и отражатель 5; экран 6 и фотоприемник 7. Отражатель 5 закреплен на торцевой поверхности цилиндрического пьезопреобразователя 8, который электрически соединен с источником стабилизированного напряжения 9 и универсальным цифровым вольтметром 10, а фотоприемник 7 электрически соединен с устройством регистрации и обработки результатов 11.

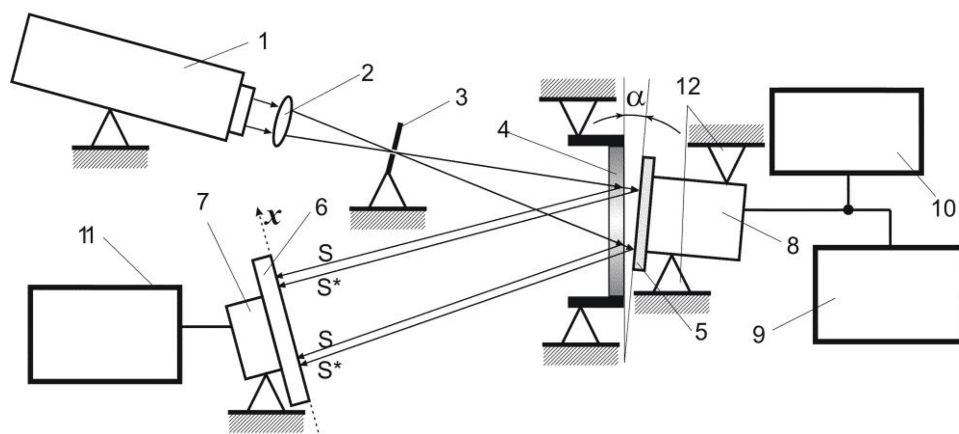


Рис.1. Схема экспериментальной установки

Установка работает следующим образом. Излучение лазера 1 после прохождения линзы 2 преобразуется в расходящийся пучок. Светоделитель 4 осуществляет деление этого пучка по амплитуде: одна часть отражается от его поверхности (направление *S-S*), а другая – от поверхности отражателя 5 (направление *S*-S**). Сформированные таким образом пучки являются когерентными. Регуляторами механизма крепления 12 пьезопреобразователя 8 добиваются пространственного совмещения предметного и опорного пучков в плоскости экрана 6, на котором формируется интерференционная картина полос равного наклона [2]. Управляя напряжением на пьезоэлектрическом преобразователе 8, можно задавать перемещение отражателя 5, что приводит к изменению параметров интерференционной картины, которая регистрируется фотоприемником 7 и обрабатывается в устройстве 11.

Все элементы схемы, исключая устройство регистрации и обработки, вольтметр цифровой, источник стабилизированного напряжения и блок питания лазера, размещены на измерительной плите установки голографической типа УИГ-22М, которая имеет специальные приспособления, позволяющие изолировать измерительную схему от колебаний конструкций здания.

Методика проведения эксперимента заключалась в пошаговом задании перемещений отражателя 5 в диапазоне от 0 до λ с шагом $\lambda/30$. Регистрация сигнала фотоприемника 7 осуществлялась на каждом шаге перемещения отражателя, цифровые изображения интерференционной картины транслировались в устройство 11 в виде стандартных форматов графических изображений.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Результатом наблюдения является интерферограмма, которая в цифровом виде (рис. 2) представляет собой дискретизированное по строкам i $(i = 1 \ldots k_Z)$, столбцам j $(i = 1 \ldots k_X)$ изображение. Значения элементов изображения $I(i, j)$ кван-

тованы на интервале $\left[0,\ldots,(2^{K}-1)\right]$, $K=8$, т.е. используется квантование уровня 8 бит.

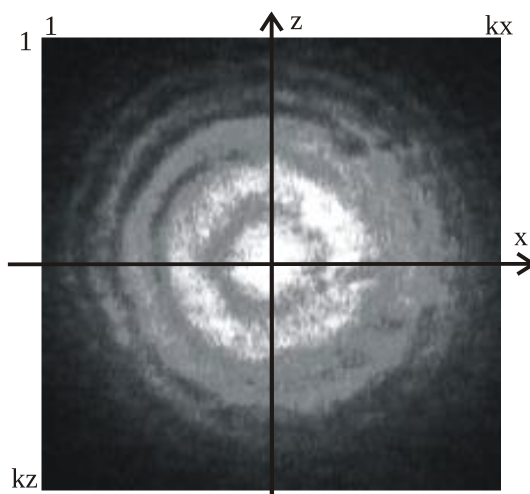


Рис.2. Опытная интерферограмма

Для определения технических преимуществ применения объемных Фурье-голограмм были исследованы два типа светоделителей, изготовленные из одной пластинки голографической типа ПФГ-03М:

1) пластинки с записанной объемной Фурье-голограммой, экспонированные во встречных пучках в соответствии с требованиями [1];

2) пластинки, экспонированные в тех же условиях, тем же лазером, но без голографической схемы.

Процесс изготовления голограммы достаточно трудоемкий и многоэтапный и на каждом его этапе накапливаются погрешности, которые вносят искажения в интерференционную картину. Поэтому все светоделители проходили дальнейшую обработку по одинаковой специальной методике и одновременно.

Результаты моделирования [3], с учетом принятых при экспонировании исходных данных (расстояние от источника излучения до поверхности отражателя 0,008 м, угол между плоскостями отражателя и фотопластинки 3°, мощность лазера 1 мВт, время экспонирования 5 с), позволяют рассматривать исследуемую голограмму как объемную.

Для большей наглядности результатов анализу подвергали одномерные распределения интенсивности в сечении интерферограммы, проходящем через ее центр, представленные на рис.3 для двух положений отражателя, отличающихся на $\lambda/4$, при этом фаза предметного пучка изменяется на π. Амплитудные значения измерительного сигнала (динамический диапазон по интенсивности) были определены в соответствии с выражением:

$$\Delta I_j = \left| I_j^0 - I_j^{180} \right|, \quad (1)$$

где I_j^0, I_j^{180} - значения интенсивности при указанных положениях отражателя (см.рис.3, кривые 1 и 2); j – номер элемента изображения по оси X в пикселях.

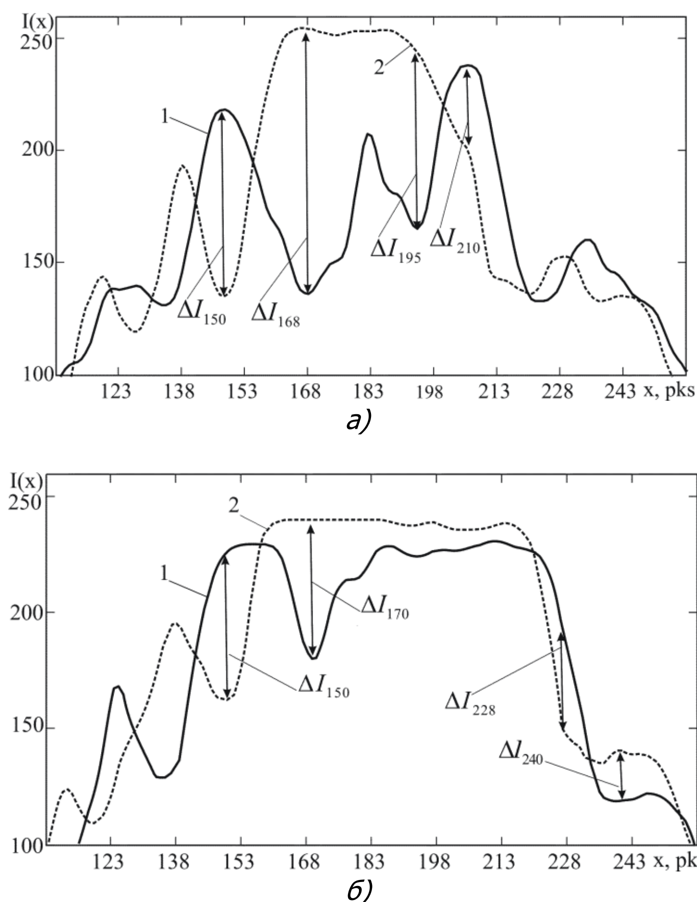


Рис.3. Одномерные распределения интенсивности
в горизонтальном сечении интерферограммы (см.рис.2) по оси X:
а – светоделитель 1; б – светоделитель 2

Из анализа рис.3 и результатов вычислений следует, что наибольшее изменение интенсивности при перемещении отражателя на $\lambda/4$ в интерференционных кольцах нулевого и первого порядков. Этот факт можно объяснить особенностями дифракции света на объемной голограмме, в результате чего основная часть оптического излучения концентрируется в центральной части изображения [4]. В отношении светоделителя второго типа следует заметить, что динамический диапазон интерферограммы ниже, особенно в центральной области, что хорошо видно из рис.3,б.

Динамический диапазон в интерференционных полосах одного порядка для различных областей интерферограммы и разных светоделителей имеет разную величину. Так, например, из рис.3,а видно, что $\Delta I_{150} > \Delta I_{210}$, $\Delta I_{168} > \Delta I_{195}$. Значения I_{max} и I_{min} для полос разных порядков и областей интерферограммы имеют тоже разные величины, поэтому, следуя [5], для сравнительного анализа примем за меру четкости интерференционных полос в точке P интерферограммы относительную величину – их «видность», определяемую как

$$\gamma = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}, \tag{2}$$

где I_{max} и I_{min} - максимальное и минимальное значение интенсивности в непосредственной близости от точки P.

Распределение «видности» γ_i интерференционных полос в рассматриваемом сечении было определено в соответствии с выражением:

$$\gamma_j = \left| \frac{I_j^0 - I_j^{180}}{I_j^0 + I_j^{180}} \right|. \tag{3}$$

Такое вычисление правомочно, так как при изменении разности фаз опорного и предметного пучков на π происходит полное изменение интенсивности интерференционных полос.

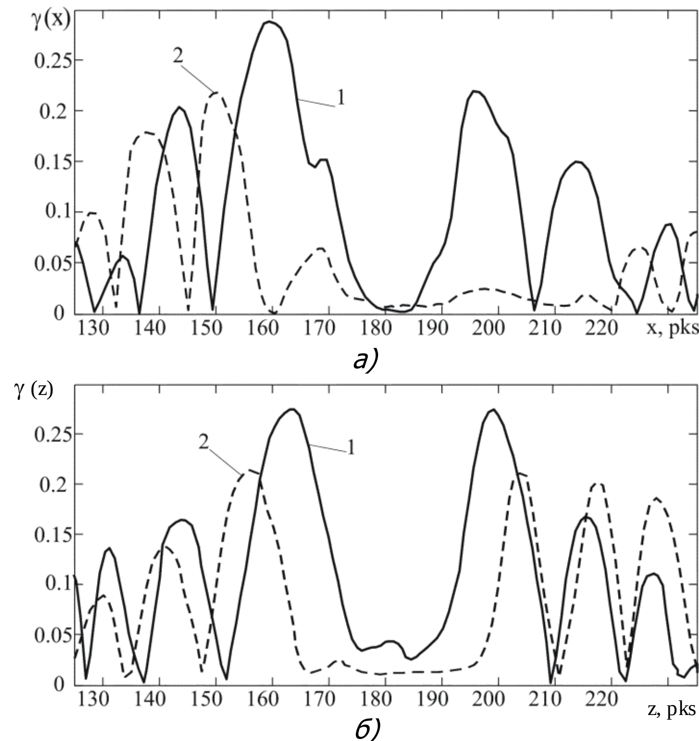


Рис.4. Значения «видности» интерференционных полос (кривая 1 - светоделитель 1, кривая 2 - светоделитель 2): а – по оси X; б – по оси Z

Из анализа распределений (рис.4), определенных по формуле (3), следует, что значения «видности» для интерференционных полос одинакового порядка, вычисленные слева и справа от оси Z (см.рис.2), существенно отличаются. Эта особенность имеет систематический характер проявления, характерна для обоих типов светоделителей и может быть объяснена влиянием угла α между отражателем и светоделителем в интерферометре, в результате чего в области, расположенной дальше от ребра клина, образованного плоскостями светоделителя и отражателя, происходит снижение контраста и смазывание интерференционных полос [5].

Для проверки этого предположения были проведены серии аналогичных опытов при повороте светоделителя на $\pi/2$, в этом случае указанная особенность сохранялась. Но при исследовании распределений в ортогональном сечении интерферограммы (вдоль оси Z) «видность» в кольцах соответствующих порядков имеет примерно одинаковые значения независимо от положения и типа светоделителя.

Результатом измерения при проведении эксперимента является зависимость интенсивности оптического поля в заданной точке или фрагменте интерференционной картины от перемещения отражателя. При этом на результат измерения оказывают влияние следующие факторы, связанные с формированием, регистрацией и обработкой интерферограмм:

- погрешности, обусловленные влиянием пятенной спекл-структуры когерентных изображений;

- погрешности, обусловленные несовершенством светоделителей и оптических элементов схемы, а также искажениями во внешней среде.

Известен ряд методов осреднения и сглаживания спекл-шума при формировании когерентных изображений. Большинство из них основывается на накоплении ансамбля некоррелированных по спекл-структуре реализаций изображения объекта с последующим осреднением. Для этого используют пространственное, временное или частотное разделение. Однако на реализацию таких методов накладывает ограничение наличие фазовых искажений, вносимых окружающей средой и оптическими элементами схемы, что обусловливает необходимость применения специальных методов адаптивного восстановления изображения, но присутствие спекл-шума существенно ухудшает эффективность адаптивных методов. Наиболее простым выходом в этой ситуации, учитывая то, что интерференционная картина имеет достаточно низкие пространственные частоты, будет применение пространственного осреднения по заданной локальной области, которое является частным случаем пространственной фильтрации, при этом задача сводится к определению размера локальной области изображения, по которой следует проводить осреднение.

Экспериментальным путем было установлено, что эффективное устранение спекл-шума и фазовых искажений, при сохранении динамического диапазона, достижимо при величине окна осреднения, не превышающей ширины интерференционного кольца первого порядка. Полученный результат поясняют зависимости изменения интенсивности оптического поля от перемещения отражателя, представленные на рис.5. На рис.5,а

показано изменение интенсивности, определенное в каждом из трех соседних элементов изображения: кривая 1 – в элементе (i, j), расположенном в середине темного кольца первого порядка на оси X; кривая 2 – в элементе $(i+1, j)$; кривая 3 – в элементе $(i+2, j)$. В этом случае погрешность определения перемещения от ошибки задания точки измерения, например $\Delta 1 \ldots \Delta 4$, имеет значительную величину при случайном характере проявления. На рис.5,б показано изменение интенсивности, вычисленное как среднее по локальным областям размера $n \times n$ элементов с центрами в точках, которые были использованы при построении кривых 1, 2 и 3 (см.рис.5,а) соответственно, здесь погрешность меньше и носит систематический характер.

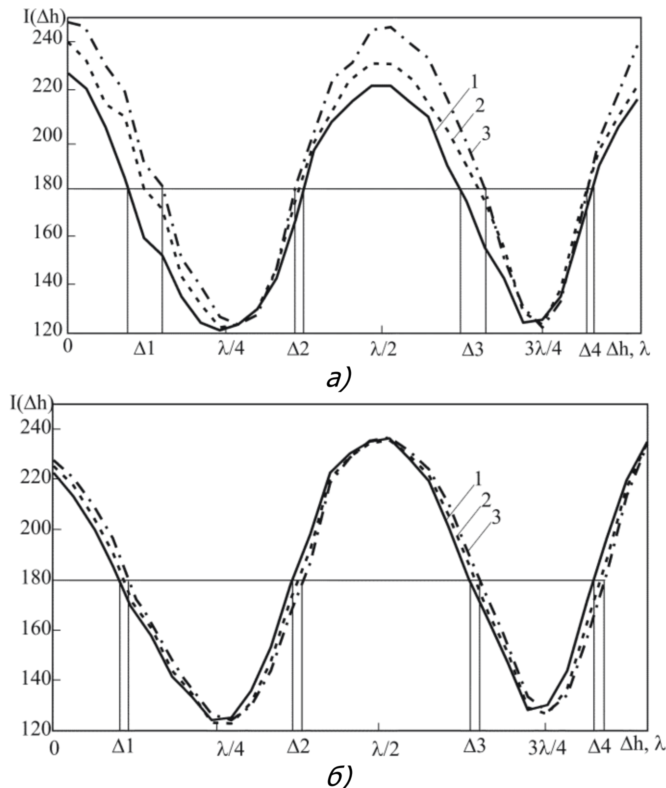


Рис.5. Зависимость интенсивности от перемещения отражателя:
а – определенное в каждом из трех соседних элементов изображения;
б – среднее по локальной области размером $n \times n$, где $n = 5$

Анализ результатов показывает, что динамический диапазон интенсивности при уровне квантования 8 бит, составляет примерно 100 градаций интенсивности (см.рис.5), что соответствует перемещению отражателя на расстояние $\Delta h = \frac{\lambda}{4} \approx 1{,}583 * 10^{-7}$ м. В этом случае можно говорить о пороге чувствительности измерителя порядка $1{,}6 * 10^{-9}$ м. Погрешностью задания перемещений отражателя при проведении исследований можно пренебречь, так как она определяется погрешностью измерения постоян-

ного напряжения цифровым вольтметром ($\delta = \pm 0{,}05\%$) и в этом случае значительно ниже порога чувствительности интерферометра.

Выводы. Применение цифровой регистрации и обработки, опытных интерферограмм позволило детально исследовать характер распределения и изменения интенсивности в плоскости интерференционной картины и выявить особенности, присущие данной схемной реализации, а также сформулировать следующие предложения по совершенствованию лазерных интерферометров:

- в качестве светоделителей целесообразно применять объемные Фурье-голограммы, так как это позволяет обеспечить сравнительно более высокий контраст и динамический диапазон интерференционной картины;
- при проведении измерений целесообразно фотодетекторы размещать в кольцах нулевого и первого порядков, используя при этом область интерферограммы с наибольшим динамическим диапазоном;
- применяя традиционные фотодетекторы, необходимо чтобы ширина интерференционного кольца была больше, чем апертура фотодиода;
- при использовании цифровой регистрации интерферограммы, например, с помощью ПЗС фотоприемников, необходимо применять пространственное осреднение интенсивности по локальной области изображения, не превышающей ширины интерференционной полосы;
- для увеличения соотношения сигнал/шум измерителя целесообразно регистрировать интенсивность, усредненную по двум локальным областям, расположенным на расстоянии половины пространственного периода интерференционной картины, т.е. в соседних полосах противоположной интенсивности. В этом случае информационным сигналом является отношение интенсивностей, что позволяет расширить динамический диапазон измерителя и снизить чувствительность к амплитудным искажениям измерительного сигнала.

В заключение следует отметить, что для контроля и компенсации проявления внешних влияющих факторов целесообразно применять комплексную коррекцию показаний интерферометра на основе интегральной оценки интенсивности оптического поля интерференционной картины [6].

Библиографический список

1. Пат. 2169348, Российская Федерация, C1 (7J01B9/01, J01C22/00). Измеритель перемещений с объемной голограммой [Текст] / И.А.Паринов, А.Г. Прыгунов, Е.В.Рожков и др. Заявл.28.09.99. Опубл.20.06.01. Бюл.№17. – С.64-69.

2. Ландсберг Г.С. Оптика. Изд. 5-е. – М.: Наука, 1976. – 928 с.

3. Нестеров В.В., Холодова С.Н. Методика определения параметров толстослойных голографических дифракционных решеток при экспонировании во встречных пучках // Вестник ДГТУ. – 2002. – №3. – С.256-262.

4. Безуглов Д.А., Прыгунов А.Г., Трепачев В.,В. Анализ дифракции света на эталонной голограмме при измерении перемещений объектов пространственно-спектральным методом // Автометрия – 1998. – №5. – С.27–37.

5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1979. – 719 с.

6. Серкин А.Г. О применении интегральной оценки интенсивности оптического поля при измерениях перемещений интерференционно-голографическими методами // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2005. – № 4. Приложение. – С. 9-13.

Материал поступил в редакцию 13.06.06.

A.G. SERKIN

EXPERIMENTAL STUDI OF THE INTERFEROMETRIC METER OF MINOR MOVEMENTS WITH THE SOLID HOLOGRAM

In this work the results of the experimental study of the interferometric meter of minor movements with the solid hologram and the experimentally validated proposals for its improvement are given.
Key words: minor movement measurement, laser interferometer, solid hologram.

СЕРКИН Александр Геннадьевич (р. 1974), старший научный сотрудник «Научно-исследовательской лаборатории №5» РВИ РВ. Окончил РВИ РВ в 1996, квалификация – инженер-метролог.
Область научных интересов: лазерная интерферометрия, метрология малых длин и перемещений.
Автор 16 научных работ.